DOI:10.24850/j-tyca-2018-03-03

Artículo

Caracterización de las sequías mediante la comparación de tres índices multiescalares en Zacatecas, México

Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico

Ruperto Ortiz-Gómez[1]

Julio C. Cardona-Díaz[2]

Fidel A. Ortiz-Robles[3]

Pedro Alvarado-Medellin[4]

[1]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería, Zacatecas, Zacatecas, México, ortizgr@uaz.edu.mx

[2]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería, Zacatecas, Zacatecas, México, julio.cardonad@gmail.com

[3]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería, Zacatecas, Zacatecas, México, fidelmprh@uaz.edu.mx

[4]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería, Zacatecas, Zacatecas, México, ampedro@uaz.edu.mx

Autor de correspondencia: Ruperto Ortiz Gómez, ortizgr@uaz.edu.mx

Resumen

La sequía es uno de los desastres naturales más frecuentes en el centro-norte de México, y su identificación y caracterización son cruciales para tratar de mitigar sus efectos. Se analizó la evolución de las sequías meteorológicas en

el estado de Zacatecas, México, para el periodo de 1961 a 2012 utilizando tres índices multiescalares: el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), basado en datos de precipitación; el Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI), y el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), basados en datos de precipitación y evapotranspiración. El patrón temporal de las sequías se analizó en tres escalas de tiempo (3, 6 y 12 meses). Los índices se compararon empleando los coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman. Los principales periodos secos fueron 1982-1983, 1998-2000 y 2010-2012. En la escala de tres meses, el SPI detectó el menor número de eventos de sequía (41), con una duración media de 2.5 meses; y en las escalas de 6 y 12 meses, el RDI detectó el menor número de eventos de sequía, 32 y 16, respectivamente, con duración media de 3.0 y 6.1 meses, respectivamente. En la escala de tres meses, el SPEI detectó el mayor número de eventos extremos, y en las escalas de 6 y 12 meses fueron el RDI y el SPI, respectivamente. En las tres escalas de análisis, el SPEI presentó el mayor porcentaje de frecuencia promedio de sequías severas. Los índices SPI *vs*. RDI presentan la correlación más alta (> 0.92), y el SPI *vs*. SPEI la correlación más baja. Las áreas más afectadas por las sequías son la región noroeste, centro y sur de Zacatecas, donde se ubican las principales zonas agrícolas de temporal y de riego del estado. Los resultados encontrados pueden ayudar principalmente en la toma de decisiones sobre los patrones de cultivo y la asignación óptima de agua en el Distrito de Riego 034 Estado de Zacatecas.

Palabras clave: sequía meteorológica, SPI, RDI, SPEI, regiones semiáridas, severidad y duración de sequías, evapotranspiración potencial, coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman.

Abstract

Drought is one of the most frequent natural disasters to occur in north-central Mexico and its identification and characterization are crucial for mitigating its effects. This study analyzed the evolution of meteorological drought over the period 1961-2012 in the state of Zacatecas, Mexico, using three multiscale indices: the Standardized Precipitation Index (SPI) based on precipitation data, the Reconnaissance Drought Index (RDI), and the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) based on precipitation and evapotranspiration data. The temporal pattern of the drought was analyzed at three time scales (3, 6 and 12 months). The indices were compared using the

Pearson and Spearman correlation coefficients. The main dry periods were 1982-1983, 1998-2000, and 2010-2012. At a 3-month scale, the SPI detected the lowest number of drought events (41), with an average duration of 2.5 months; and at 6- and 12-month scales, the RDI detected the lowest number of drought events, 32 and 16, respectively, with an average duration of 3.0 and 6.1 months, respectively. The SPEI detected the greatest number of extreme events at the 3-month scale, and the RDI and the SPI did so at the 6- and 12-month scales, respectively. For the three scales of analysis, the SPEI had the greatest average frequency percentage of severe droughts. The SPI vs RDI had the highest correlation (> 0.92), and the SPI vs SPEI had lowest correlation. The areas that were most affected by droughts were the northwestern, central, and southern regions of Zacatecas, where the principal rainfed and irrigated agriculture areas of the state are located. The findings can primarily help decision-making regarding cropping patterns and the optimal allocation of water in Irrigation District 034 in the state of Zacatecas.

Keywords: Meteorological drought, SPI, RDI, SPEI, semiarid regions, severity and duration of droughts, potential evapotranspiration, Pearson and Spearman correlation coefficients.

Recibido: 14/11/2016

Aceptado: 18/01/2018

Introducción

El centro y norte de México se encuentran dentro de la franja de alta presión de latitud norte, por lo que estas zonas son áridas y semiáridas, que coinciden en latitud con los grandes desiertos de África y Asia. En consecuencia, tales regiones no disponen de agua en cantidades suficientes y de forma histórica han sido afectadas por las sequías. En el siglo XX, México presentó cuatro grandes periodos de sequía: 1948-1954, 1960-1964, 1970-1978 y 1993-1996,

así como una sequía severa en 1998, las cuales afectaron en particular a los estados del norte del país (Cenapred, 2007). De acuerdo con Escalante y Reyes (1998), el estado de Zacatecas, ubicado en el centro-norte de México, está entre los estados con más daños a la agricultura y la ganadería por las sequías ocurridas durante el periodo de 1988 a 1995.

Recientemente, en México se han registrado varias sequías de magnitud considerable entre los años 2000-2003, 2009 y 2011-2012. Entre los años 2000 y 2003, 18 de los 32 estados de México presentaron sequía; los estados del norte, incluyendo Zacatecas, fueron los más afectados. Las pérdidas económicas ascendieron a más de 1 800 millones de pesos (188 millones de dólares), cerca de un millón de hectáreas de cultivo fueron afectadas y se perdieron más de 13 mil cabezas de ganado (Cenapred, 2002; Cenapred, 2003; Cenapred, 2004). En 2009, México sufrió la segunda peor sequía en 60 años: los daños ascendieron a 3 081 millones de pesos (229 millones de dólares) y la superficie de cultivos y pastizales afectada fue de 384 540 hectáreas. Zacatecas estuvo entre los cinco estados con mayor superficie afectada (Semarnat, 2012). A finales de 2011 y hasta mediados de 2012, más de 60% de México sufrió la peor sequía en los últimos 70 años, clasificada según el Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, por sus siglas en inglés) de intensidad severa a excepcional (Semarnat, 2012). Además, según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, por sus siglas en inglés), esta sequía generó pérdidas económicas en el sector agrícola de más de 16 000 millones de pesos (1 300 millones de dólares) (Herron, 2013). El estado de Zacatecas fue de los más afectados por este desastre natural. Bajo tal contexto, es importante conocer el comportamiento puntual y regional de la sequía en el estado de Zacatecas para poder establecer medidas de mitigación.

Las sequías pueden tener repercusiones graves y duraderas en los sistemas naturales y humanos, que incluyen desastres humanitarios, pérdidas económicas y tensiones en los ecosistemas naturales (Touma, Ashfaq, Nayak, Kao, & Diffenbaugh, 2015). La sequía es impulsada por variaciones climáticas y por condiciones hidrológicas adversas (Li, Liang, Yu, & Acharya, 2014). Aunque la sequía es la consecuencia de una reducción natural en la cantidad de precipitación en un periodo de tiempo, su severidad se evalúa en términos de su duración, época de ocurrencia, extensión territorial afectada y, fundamentalmente, en los impactos que causa a las actividades humanas y agrícolas, así como al medio ambiente (Caparrini & Manzella, 2009). La sequía

ha sido clasificada en cuatro categorías: meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Samaniego, Kumar, & Zink, 2013).

La complejidad para definir una sequía se debe a la dificultad de cuantificar su magnitud o severidad, pues por lo habitual ésta se identifica por sus efectos sobre diferentes sistemas (recursos hídricos, agricultura, ecología, pérdidas económicas, etc.); sin embargo, no existe una variable física que permita medir en específico la severidad de la sequía. La cuantificación de la sequía por lo general se realiza empleando índices de sequía (Asadi-Zarch, Sivakumar, & Sharma, 2015), los cuales se basan en información de precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales en ríos u otras variables hidrometeorológicas medibles, y que cuantifican el riesgo de sequía. En la actualidad existe una gran cantidad de índices para cuantificar las sequías; los más utilizados a nivel mundial son el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) desarrollado por McKee, Doesken y Kleist (1993), que consiste en un enfoque probabilístico de la precipitación, y el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés), desarrollado por Palmer (1965), que analiza el balance de agua en el suelo. Recientemente, la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) presentó el SPI como el índice de sequía universal (Hayes, Svoboda, Wall, & Widhalm, 2011; WMO, 2012). La ventaja principal del SPI es que se puede calcular en diferentes escalas de tiempo (por lo habitual en 1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48 meses) y representar las variaciones hidrológicas de los déficits de precipitación. Sin embargo, el SPI tiene una desventaja: sólo utiliza información de precipitación, sin tener en cuenta otras variables climatológicas que juegan un papel importante durante el desarrollo de un evento de sequía (Teuling *et al*., 2013). Recientemente, se han desarrollado índices que incorporan la evapotranspiración para evaluar la sequía. Por ejemplo, Tsakiris y Vangelis (2005), propusieron el Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI, por sus siglas en inglés), que analiza el cociente entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial acumulada (ETP) desde un punto de vista probabilístico; por su parte, Vicente-Serrano, Beguería y López-Moreno (2010), desarrollaron el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI, por sus siglas en inglés), que consiste en un balance hídrico climático mensual.

La complejidad del fenómeno de sequía hace que ningún índice de sequía se pueda aplicar en todas las regiones o sistemas naturales. Por lo tanto, para un análisis de sequía es conveniente considerar más de un índice, a fin de

examinar la sensibilidad y precisión de cada uno de ellos, y explorar su comportamiento ante condiciones y finalidades específicas. La caracterización de un evento de sequía implica la identificación de la fecha de inicio y de finalización, su duración, magnitud (severidad) e intensidad (McKee *et al*., 1993; Kavalieratou, Karpouzos, & Babajimopoulos, 2012). Otras características de las sequías son la cobertura espacial (extensión superficial) y la frecuencia con que éstas ocurren (Kirono, Kent, Hennessy, & Mpelasoka, 2011).

Los objetivos de este trabajo fueron: (a) investigar las principales características de las sequías meteorológicas en el estado de Zacatecas durante el periodo de 1961 a 2012, utilizando los índices multiescalares de sequía SPI, RDI y SPEI; y (b) comparar el comportamiento temporal y espacial de los índices de sequía utilizados.

Materiales y métodos

Características del área de estudio

El estado de Zacatecas está ubicado entre las coordenadas 21° 01’ 00’’ y 25° 07’ 00’’ de latitud norte, y 100° 43’ 00’’ y 104° 22’ 00’’ de longitud oeste, y cuenta con una superficie de 75 284 km^2. Los principales tipos de clima que presenta el estado son seco y semiseco (73%), y templado subhúmedo (17%). La temperatura media anual es de 17 °C, y las temperaturas máxima y mínima promedio anuales son de 30 °C (mayo) y 3 °C (enero), respectivamente. La precipitación media anual en Zacatecas es de 510 mm, con precipitaciones de 300 mm en el norte y de 860 mm en el sur; las lluvias se concentran en verano (75%), de junio a septiembre. El clima del estado de Zacatecas es una limitante para la agricultura, principal actividad económica, que destina

alrededor de 1.74 millones de hectáreas, de las cuales 88% es de temporal (secano).

Información climatológica

Para identificar los eventos de sequía, así como para evaluar sus duraciones, magnitudes, e intensidades y frecuencias, en esta investigación se utilizaron las series de datos de precipitación y temperatura diaria de nueve estaciones climatológicas en el estado de Zacatecas (Figura 1), tomadas de la base de datos del CLICOM (Conagua, 2014), para el periodo del 1° de enero de 1961 al 31 de diciembre de 2012. Los descriptores geográficos (coordenadas y altitud) de las estaciones climatológicas y los valores medios anuales correspondientes a precipitación, *P*, y temperatura, *T*, se presentan en la Tabla 1.

No se puede mostrar la imagen.

Figura 1. Estaciones climatológicas seleccionadas para el análisis de la sequía.

Tabla 1. Estaciones climatológicas y su precipitación y temperatura media anual.

Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (msnm)	Periodo	Precipi-tación (mm)	Tempe-ratura (ºC)
32052	San Rafael	24º 35’	102º 06’	2 014	1961-2012	262.8	14.4
32028	Juan Aldama	24º 16’	103º 23’	1 999	1961-2012	433.0	18.0
32001	Agua Nueva	23º 47’	102º 09’	1 946	1961-2012	349.1	17.7
32054	Sombrerete (DGE)	23º 38’	103º 38’	2 300	1961-2012	551.4	16.4
32018	El Sauz	23º 16’	103º 06’	2 096	1961-2012	414.7	16.0
32003	Calera	22º 54’	102º 39’	2 097	1961-2012	426.5	15.6
32030	La Florida	22º 41’	103º 36’	1 870	1961-2012	590.3	16.4
32024	Guadalupe Victoria	22º 23’	101º 49’	2 132	1971-2012	374.1	16.4
32032	La Villita	21º 36’	103º 20’	1 786	1961-2012	782.3	20.4

Metodología

En esta investigación se emplearon tres de los índices de sequía más usados y conocidos a nivel internacional: el Índice de Precipitación Estandarizado, el Índice de Reconocimiento de Sequías y el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado. La caracterización de las sequías se llevó a cabo en seis etapas: 1) selección y control de calidad de la información climatológica; 2) selección de la escala de análisis; 3) cálculo de la

evapotranspiración potencial (ETP); 4) cálculo de los índices SPI, RDI y SPEI en las escalas de tiempo de 3, 6 y 12 meses; 5) análisis de las características de las sequías; y 6) comparación de los índices de sequía meteorológica. En la Figura 2 se presenta de modo esquemático el desarrollo metodológico de la investigación.

No se puede mostrar la imagen.

Figura 2. Diagrama esquemático del desarrollo metodológico para el análisis de las sequías.

Selección y control de calidad de la información climatológica

Una etapa fundamental en el análisis de series de tiempo hidroclimatológicas, como es el caso del análisis de sequías, es la selección y control de la calidad de la información. La selección de la información climatológica empleada se basó en particular en cuatro criterios: (1) que la estación climatológica estuviera activa para poder evaluar las sequías de los últimos años; (2) que la longitud de los registros de precipitación y temperatura de cada estación climatológica fuera de al menos 40 años; (3) que el porcentaje de datos faltantes fuera menor o igual al 15%, para no perder representatividad en los datos; y (4) que las estaciones estuvieran distribuidas en toda la zona de estudio, a fin de tener una buena representación espacial de la sequía.

Para el análisis de la sequía se llevaron a cabo controles de calidad preliminares de las series de datos de precipitación y temperatura, revisando la homogeneidad de las series de información climatológica y completando los datos faltantes. Para revisar la homogeneidad de los datos de precipitación y temperatura se aplicaron pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas a las series anuales. Las pruebas seleccionadas fueron la *t* de Student, la prueba de Cramer (Mirza, 1997), y las Pruebas de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT, por sus siglas en inglés) y de Buishand (Hänsel, Medeiros, Matschullat, Petta, & De Mendonça-Silva, 2016).

Para seleccionar el método de complementación de datos faltantes se probaron varios métodos: interpolación polinomial, promedio aritmético, inverso de la distancia y relación normal (Tabios III & Salas, 1985; Dingman, 2002); el método que presentó mejores resultados fue el de la relación normal (ecuación (1)):

$$\hat{p}_m = \frac{1}{n_g} \sum_{g=1}^{n_g} \frac{\bar{p}_m}{\bar{p}_g} p_g \qquad (1)$$

donde $\hat{p}_m$ es el dato faltante a estimar para el día, mes o año en la estación de análisis m; g, las estaciones vecinas; n_g, el número de estaciones vecinas consideradas en el análisis; $\bar{p}_m$ y $\bar{p}_{\mathrm{g}}$ son la precipitación media anual en la estación m con información faltante y en las estaciones vecinas g, respectivamente, y p_g es la precipitación regitrada en las estaciones vecinas el día, mes o año en el que falta el dato en la estación m. Este método fue aplicado de manera análoga a los datos de temperatura.

Selección de las escalas de análisis de la sequía (*k*)

Para investigar las características de la sequía, la escala de tiempo k juega un papel importante. Las escalas temporales k cortas son relevantes por ser representativas de sequías meteorológicas y agrícolas. Una escala temporal de tres meses da una estimación estacional de la precipitación, que refleja las condiciones de humedad a corto y mediano plazos. Una escala de seis meses estima la precipitación a mediano plazo, la cual puede estar asociada con niveles en embalses y caudales anómalos, mientras una escala temporal k más larga de 12 meses refleja los patrones de precipitación a largo plazo, que probablemente están relacionados con caudales, niveles de embalse e incluso niveles de agua subterránea, y permiten identificar la sequía hidrológica.

En esta investigación fueron seleccionadas las escalas k de 3, 6 y 12 meses, para los índices SPI, RDI y SPEI (SPI-3, SPI-6, SPI-12, RDI-3, etc.), con el fin de obtener perspectivas a corto, mediano y relativamente largo plazos sobre las características de la sequía.

Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP)

Para el cálculo de los índices RDI y SPEI, la evapotranspiración potencial fue estimada mediante el método de Thornthwaite (1948), como lo proponen Tsakiris y Vangelis (2005), y Vicente-Serrano *et al*. (2010). Este método es uno de los más sencillos para calcular la ETP (ecuación (2)), ya que sólo requiere de datos de temperatura media mensual y la latitud del lugar donde se desea estimar la ETP:

$$ETP = 16K\left(\frac{10T}{I}\right)^{m} \qquad (2)$$

donde ETP es la evapotranspiración potencial mensual (mm/mes); T, la temperatura media mensual (°C), e I es el índice de calor (ecuación (3)), el cual se calcula como la suma de 12 valores de índices mensuales:

$$I = \sum_{j=1}^{12}\left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514} \qquad (3)$$

m es un coeficiente que depende del índice de calor I.

$$m = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492 \qquad (4)$$

K es un coeficiente de corrección calculado como una función de la latitud y el mes:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right)\left(\frac{NDM}{30}\right) \qquad (5)$$

donde NDM es el número de días del mes y N el número máximo de horas de sol (ecuación (6)).

$$N = \left(\frac{24}{\pi}\right) w_s \tag{6}$$

y w_s es el ángulo horario de la salida del sol (ecuación (7)):

$$w_s = arccos(-tan\varphi tan\delta) \tag{7}$$

en la cual, φ es la latitud (radianes) de la estación climatológica y δ la declinación solar (radianes) calculada como:

$$\delta = 0.4093\ sen\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.405\right) \tag{8}$$

donde J es el día Juliano promedio del mes.

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El SPI considera la precipitación como variable única de análisis y estima si en una región, en un determinado periodo, hay déficit o exceso de precipitación respecto a las condiciones normales (Hayes, Svoboda, Wilhite, & Vanyarkho, 1999). El cálculo del SPI se basa en registros de precipitación de largo plazo; Guttman (1994) señala que se necesitan de preferencia registros de 50 a 60 años o más, aunque otros investigadores (Wu, Hayes, Wilhite, & Svoboda, 2005; Li *et al*., 2014) recomiendan tener al menos 30 años. El SPI se calcula ajustando una función de distribución de probabilidad (fdp) apropiada, generalmente la función de distribución Gamma, a los datos de precipitación mensual acumulada, para cada escala de tiempo k de interés y para cada sitio

de interés en el espacio; los valores del SPI se obtienen transformando los valores de la distribución Gamma en valores de la variable normal estándar. La función de densidad de probabilidad Gamma está definida por:

$$g(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b} \; para \; x > 0 \tag{9}$$

donde a es el parámetro de forma; b, el parámetro de escala; x, la precipitación mensual acumulada ($x > 0$), en mm, y $\Gamma(a)$ es la función Gamma. Los parámetros a y b pueden estimarse por varios métodos, cuyos valores por el método de máxima verosimilitud son (Haan, 1977):

$$a = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \tag{10}$$

$$b = \frac{\bar{x}}{a} \tag{11}$$

donde A es una variable auxiliar que está definida por:

$$A = ln(\bar{x}) - \frac{1}{n'}\sum_{i=1}^{n'} x_i \tag{12}$$

donde n' es el número de datos de precipitación x_i diferentes de cero, y $\bar{x}$ es el valor medio de los datos x_i.

Integrando la función de densidad Gamma (ecuación (9)) con respecto a x, se obtienen la función de distribución acumulada $G(x)$:

$$G(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x x^{a-1}\, e^{-x/b}\, dx \qquad (13)$$

Considerando $t = x/b$, entonces la ecuación (13) se reduce a la función Gamma incompleta:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1}\, e^{-t}\, dt \qquad (14)$$

Dado que la función Gamma no está definida para $x = 0$, y las series de precipitación pueden tener valores de cero, entonces la probabilidad acumulada puede calcularse como (Angelidis, Maris, Kotsovinos, & Hrissanthou, 2012):

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \qquad (15)$$

donde $H(x)$ es una función de probabilidad acumulada; q, la probabilidad de tener valores de precipitación igual a cero, y $G(x)$ es la probabilidad acumulada de la función Gamma incompleta.

Si m es el número de ceros en la serie de precipitación, entonces $q = m/n$, donde n es el número total de datos de la serie de precipitación, según la

escala de análisis k. Cuando la serie no tiene valores de precipitación igual a cero, $q = 0$, por lo cual, $H(x) = G(x)$, y cuando $x = 0$, $H(0) = q$.

Finalmente, para definir el valor del SPI, la distribución de probabilidad acumulada $H(x)$ se transforma en la variable normal estándar Z de media cero y varianza uno (Edwards & McKee, 1997), utilizando la aproximación propuesta por (Zelen & Severo, 1965):

$$Z = SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right);\ t = \sqrt{In\left(\frac{1}{\left(H(x)\right)^2}\right)}\ para\ 0 < H(x) \leq 0.5 \tag{16}$$

$$Z = SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right);\ t = \sqrt{In\left(\frac{1}{\left(1 - H(x)\right)^2}\right)}\ para\ 0.5 < H(x) < 1.0 \tag{17}$$

donde $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$ y $d_3 = 0.001308$.

Un evento de sequía ocurre cuando a cualquier escala de tiempo, el SPI es continuamente negativo y alcanza un valor de -1.0 o menor, y termina cuando el SPI llega a ser positivo (McKee *et al*., 1993; Vrochidou y Tsanis, 2012). Los valores del SPI se pueden comparar con facilidad y de forma simultánea en los ámbitos espacial y temporal (Lopez-Bustins, Pascual, Pla, & Retana, 2013). Con base en el rango de valores del SPI, los eventos de sequía se clasifican de ligeros a extremos (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación del SPI (McKee *et al*., 1993).

Valor SPI	Clasificación
≥ 2.00	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Severamente húmedo

Valor SPI	Clasificación
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
0 a 0.99	Ligeramente húmedo (cercano a lo normal)
0 a -0.99	Sequía ligera (cercano a lo normal)
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
≤ -2.00	Sequía extrema

El Índice de Reconocimiento de Sequías (RDI)

El RDI se puede calcular en diferentes escalas de tiempo y su interpretación es similar a la del SPI (Tabla 2) (Vicente-Serrano, Van der Schrier, Beguería, Azorin-Molina, & López-Moreno, 2015; Xu *et al*., 2015). Entre las principales limitaciones teóricas de este índice de sequía se destaca que no es válido cuando el valor de la ETP es igual a 0, lo cual es muy común en regiones frías en invierno (Vicente-Serrano *et al*., 2015). El RDI se expresa en tres formas: el valor inicial (α_k), el RDI normalizado (RDIn) y el RDI estandarizado (RDIst). El valor inicial (α_k) se presenta en forma agregada utilizando una escala de tiempo mensual, y puede calcularse sobre una base mensual, estacional o anual (Asadi-Zarch, Malekinezhad, Mobin, Dastorani, & Kousari, 2011), y sus valores se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\delta_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{k} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{k} ETP_{ij}} \quad i = 1,2,3,\dots,N_a \qquad (18)$$

donde P_{ij} y ETP_{ij} son la precipitación y la evapotranspiración potencial del mes j del año i, respectivamente, en mm; N_a, el número de años de información disponible, y k es la escala de análisis en que se calcula el RDI.

Las formas normalizada y estandarizada del RDI son (Tsakiris, Pangalou, & Vangelis, 2007):

$$RDI_n^{(i)} = \frac{\delta_k^{(i)}}{\bar{\delta}_k^{(i)}} - 1 \tag{19}$$

$$RDI_{st(k)}^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_{yk}} \tag{20}$$

donde $\bar{\delta}_k^{(i)}$ es la media aritmética de $\delta_k^{(i)}$ y $y_k^{(i)}$ son los logaritmos naturales de δ_k^i, cuya media y desviación estándar son $\bar{y}_k$ y $\hat{\sigma}_{yk}$, respectivamente.

De acuerdo con diferentes investigaciones con datos de distintos lugares y diferentes escalas de tiempo de análisis, se observó que en casi todos los casos, los valores de δ_k siguen tanto una distribución Gamma como una Lognormal. Aunque en la mayoría de los casos la distribución Gamma resultó más exitosa (Kousari *et al*., 2014; Cai, Zhang, Yao, & Chen, 2015).

Según Tigkas (2008) y Asadi-Zarch *et al*. (2011) se ha probado que el cálculo de RDIst podría realizarse mejor ajustando la distribución Gamma a la distribución de frecuencias de δ_k, ya que este método tiende a resolver el problema de calcular el RDIst para las escalas de tiempo k pequeñas, que pueden incluir valores de precipitación cero ($\delta_k = 0$), para los cuales la ecuación (20) no está definida.

En este estudio, el RDI se obtuvo ajustando la distribución Gamma a los valores δ_k, de forma similar al SPI, mediante las ecuaciones (10) a (17), sustituyendo los valores de δ_k en lugar de x.

El Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI)

La principal limitación del SPI es que se basa sólo en la precipitación e ignora otras variables que afectan la demanda de agua atmosférica, como temperatura, velocidad del viento, radiación solar y déficit de presión de vapor (McEvoy, Huntington, Abatzoglou, & Edwards, 2012). Para superar esta limitación, Vicente-Serrano *et al*. (2010) desarrollaron el SPEI, el cual combina la sensibilidad del PDSI con los cambios en la demanda de la evaporación causados por fluctuaciones y tendencias de la temperatura, con la sencillez de cálculo y la naturaleza multiescalar del SPI (Vicente-Serrano *et al*., 2010; Banimahd & Khalili, 2013; Li *et al*., 2014).

El SPEI se basa en un balance de agua climático mensual (precipitación menos evapotranspiración potencial, llamada serie *D*) que se calcula en diferentes escalas de tiempo y matemáticamente es similar al SPI, pero incluye el papel de la evapotranspiración potencial (López-Moreno *et al*., 2013). Su cálculo sigue un enfoque similar al seguido para el cálculo del SPI, pero utilizando una distribución de probabilidad Log-logística de tres parámetros en lugar de la distribución Gamma de dos parámetros (Figura 2). La clasificación de sequía del SPI puede ser usada también para evaluar el SPEI (Tabla 2).

Para el cálculo del SPEI, primero se calcula la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial del mes j del año i (serie D^{ij}), en mm; después la serie D^{ij} se agrega en la escala de tiempo k de interés para obtener las series D_k^{ij}, en milímetros.

$$D^{ij} = P_{ij} - ETP_{ij} \tag{21}$$

donde P_{ij} y ETP_{ij} tienen el mismo significado que en la ecuación (18).

Para el cálculo del SPEI es necesario utilizar una distribución de probabilidad de tres parámetros, dado que en una de dos parámetros, la variable x tiene un límite inferior de cero $(0 < x < \infty)$, mientras que en una función de distribución de tres parámetros, x puede tomar valores en el rango ($\gamma < x < \infty$, donde γ es el parámetro de origen de la distribución), por lo cual, Vicente Serrano *et al*. (2010) propusieron utilizar la distribución Log-logística de tres parámetros, pues la serie D_k puede tener valores negativos, y cuya función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \tag{22}$$

donde α, β, y γ son los parámetros de escala, forma y origen, respectivamente, para los valores D_k en el rango de $(\gamma > D_k < \infty)$.

Los parámetros de la distribución Log-logística pueden obtenerse por diferente métodos, de los cuales, el método de momentos L es el más robusto y de fácil aplicación (Ahmad, Sinclair, & Werritti, 1988; Singh, Guo, & Yu, 1993):

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \tag{23}$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \tag{24}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1-\frac{1}{\beta}\right) \tag{25}$$

donde $\Gamma(1+1/\beta)$ es la función Gamma de $(1+1/\beta)$, y w_s es el momento de probabilidad pesada de orden s $(s = 0,1,2)$:

$$w_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \left(1 - \frac{i - 0.35}{n}\right)^s \tag{26}$$

donde x_i es la muestra aleatoria ordenada $(x_1 < x_2, \cdots, < x_n)$ de los valores de D_k y n es el tamaño de la muestra.

La distribución de probabilidad de las series D_k, de acuerdo con la distribución Log-logística está dada por (Vicente-Serrano *et al*., 2010):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \tag{27}$$

Finalmente, para obtener los valores del SPEI, los valores de $F(x)$ se transforman en la variable normal estándar Z, sustituyendo $F(x)$ por $H(x)$ en las ecuaciones (16) y (17).

Comparación de los índices de sequía

Los índices SPI, RDI y SPEI siguen metodologías similares y sus valores tienen el mismo significado estadístico, por lo tanto, son comparables. Para realizar la comparación entre los índices de sequía se utilizaron los coeficientes de correlación de Pearson (r) y de Spearman (r_s).

Resultados y discusión

En esta investigación se definió un evento de sequía como aquel en el que los valores del SPI, RDI o SPEI toman valores del índice iguales o menores a -1.0. Se determinó el número de eventos de sequía, así como la duración y magnitud de cada evento para las escalas de 3, 6 y 12 meses, para cada una de las nueve estaciones analizadas.

Un análisis general de los índices de sequía analizados muestra que tanto local como regionalmente estos índices siguen el mismo patrón temporal para el periodo de 1961-2012. De acuerdo con el SPI, el RDI y el SPEI, los periodos húmedos más importantes fueron de 1965-1968, 1990-1992 y 2003-2005, y los principales eventos de sequía se produjeron en 1969-1970, 1982-1983, 1998-2000 y 2010-2012.

Los tres índices analizados mostraron resultados consistentes en la detección de los grandes eventos de sequía respecto a su magnitud y duración (Tabla 3). Las series del SPI, RDI y SPEI tuvieron pocas diferencias entre sí, independientemente de la escala de tiempo de análisis. Estos resultados muestran que en condiciones climáticas donde existe baja variabilidad interanual de la temperatura, los índices de sequía analizados responden principalmente a la variabilidad de la precipitación.

Tabla 3. Valores máximos de las características de las sequías para todas las estaciones y escalas de tiempo.

Índice	**Estación**	**Duración**		**Severidad (magnitud)**		**Intensidad**	
		Valor	**Periodo**	**Valor**	**Periodo**	**Valor**	**Periodo**
	32052	6	12/2010 - 05/2011	-8.426	12/2010 - 05/2011	-1.483	04/1962 - 04/1962
	32028	7	12/1988 - 06/1989	-9.005	12/1988 - 06/1989	-1.361	04/1964 - 04/1964
SPI-3	32018	6	12/2010 - 05/2011	-9.696	12/2010 - 05/2011	-1.713	01/1972 - 02/1972
	32024	6	12/2000 - 05/2001	-9.396	12/2000 - 05/2001	-1.574	04/1973 - 04/1973
	32032	6	12/2002 - 05/2003	-8.936	12/2010 - 04/2011	-1.787	12/2010 - 04/2011
	32052	7	12/2010 - 06/2011	-9.711	12/2010 - 06/2011	-1.483	02/1966 - 02/1966

	32028	7	12/1988 - 06/1989	-9.109	12/1988 - 06/1989	-1.361	04/1964 - 04/1964
RDI-3	32018	6	12/2010 - 05/2011	-9.877	12/2010 - 05/2011	-1.713	01/1972 - 02/1972
	32024	6	12/2000 - 05/2001	-9.414	12/2000 - 05/2001	-1.574	04/1961 - 05/1961
	32032	6	12/2010 - 05/2011	-10.102	12/2010 - 05/2011	-1.787	05/1970 - 05/1970
	32052	6	05/1974 - 10/1974	-9.775	05/1974 - 10/1974	-1.900	06/1965 - 06/1965
	32028	5	04/1982 - 08/1982	-8.923	05/1980 - 08/1980	-2.231	05/1980 - 08/1980
SPEI-3	32018	5	05/1962 - 09/1962	-7.463	05/1962 - 09/1962	-2.048	05/1990 - 06/1990
	32024	4	04/1989 - 07/1989	-7.247	04/1989 - 07/1989	-1.969	05/1998 - 06/1998
	32032	4	04/2011 - 07/2011	-9.134	04/2011 - 07/2011	-2.320	05/2010 - 06/2010
	32052	10	12/1984 - 09/1985	-14.918	12/1984 - 09/1985	-2.416	05/1980 - 05/1980
	32028	6	02/1989 - 07/1989	-10.971	02/1989 - 07/1989	-2.173	04/1979 - 05/1979
SPI-6	32018	5	03/2011 - 07/2011	-10.564	03/2011 - 07/2011	-2.113	03/2011 - 07/2011
	32024	6	01/2001 - 06/2001	-12.945	01/2001 - 06/2001	-2.189	02/1990 - 05/1990
	32032	4	03/2011 - 06/2011	-8.633	03/2011 - 06/2011	-2.525	04/1991 - 05/1991
	32052	15	12/1984 - 02/1986	-20.798	12/1984 - 02/1986	-2.437	05/1980 - 05/1980
	32028	5	03/1989 - 07/1989	-10.325	03/1989 - 07/1989	-2.094	04/1991 - 06/1991
RDI-6	32018	6	03/2011 - 08/2011	-12.613	03/2011 - 08/2011	-2.166	02/1976 - 06/1976
	32024	6	01/2001 - 06/2001	-13.096	01/2001 - 06/2001	-2.243	04/1981 - 05/1981
	32032	4	03/2011 - 06/2011	-9.290	03/2011 - 06/2011	-2.622	04/1991 - 05/1991

	32052	6	06/1974 - 11/1974	-10.257	06/1974 - 11/1974	-1.877	07/1989 - 11/1989
	32028	6	06/1980 - 11/1980	-12.848	06/1980 - 11/1980	-2.141	06/1980 - 11/1980
SPEI-6	32018	7	05/2011 - 11/2011	-12.414	05/2011 - 11/2011	-1.881	07/1962 - 11/1962
	32024	7	04/1989 - 10/1989	-12.949	04/1989 - 10/1989	-1.850	04/1989 - 10/1989
	32032	9	03/2011 - 11/2011	-16.395	03/2011 - 11/2011	-1.822	03/2011 - 11/2011
	32052	40	06/1985 - 09/1988	-65.884	06/1985 - 09/1988	-1.837	11/1975 - 05/1976
	32028	18	07/2011 - 12/2012	-30.437	07/2011 - 12/2012	-2.074	06/1978 - 06/1978
SPI-12	32018	18	02/2011 - 07/2012	-38.158	02/2011 - 07/2012	-2.120	02/2011 - 07/2012
	32024	20	08/1989 - 03/1991	-35.080	08/1989 - 03/1991	-1.754	08/1989 - 03/1991
	32032	23	02/2011 - 12/2012	-44.154	02/2011 - 12/2012	-1.920	02/2011 - 12/2012
	32052	40	06/1985 - 09/1988	-61.101	06/1985 - 09/1988	-1.832	11/1975 - 05/1976
	32028	14	07/2011 - 08/2012	-24.325	07/2011 - 08/2012	-1.835	06/1982 - 04/1983
RDI-12	32018	18	02/2011 - 07/2012	-36.955	02/2011 - 07/2012	-2.053	02/2011 - 07/2012
	32024	20	08/1989 - 03/1991	-35.433	08/1989 - 03/1991	-1.772	08/1989 - 03/1991
	32032	23	02/2011 - 12/2012	-52.654	02/2011 - 12/2012	-2.289	02/2011 - 12/2012
	32052	25	12/1961 - 12/1963	-40.618	12/1961 - 12/1963	-1.625	12/1961 - 12/1963
	32028	12	06/1980 - 05/1981	-22.007	06/1980 - 05/1981	-1.935	06/1982 - 04/1983
SPEI-12	32018	18	02/2011 - 07/2012	-30.817	02/2011 - 07/2012	-1.814	08/1962 - 06/1963
	32024	24	06/1989 - 05/1991	-38.493	06/1989 - 05/1991	-1.629	12/1971 - 11/1972

	32032	26	11/2010 - 12/2012	-50.699	11/2010 - 12/2012	-1.950	11/2010 - 12/2012

Los resultados de los índices SPI y RDI son similares en las escalas de 3 y 6 meses (SPI-3 y RDI-3; y SPI-6 y RDI-6). Con el SPI-3 y el RDI-3 la mayoría de los periodos de sequía se detectó en los meses de enero a mayo; con el SPEI-3 se detectó de abril a julio. Respecto al SPI-6 y RDI-6, la mayoría de los periodos secos ocurrió en los meses de marzo a junio; con el SPEI-6 se presentó de mayo a septiembre. Se observa que, para estas escalas, el SPEI detecta la sequía varios meses después que el SPI y el RDI debido a la relación que existe entre precipitación y temperatura en los primeros meses del año. En la escala de 12 meses, los resultados de los tres índices son similares, aunque en los periodos importantes en cuanto a duración, magnitud e intensidad presentan mayor semejanza el SPI-12 y el RDI-12. Según el SPI-12, el RDI-12 y el SPEI-12 en 1962, 1969, 1979, 1982, 1998, 1999, 2000, 2011 y 2012 hubo importantes periodos de sequía. Años que en su mayoría fueron detectados con sequía por Campos-Aranda (2014) en la estación climatológica Fresnillo en el centro de Zacatecas, con el Índice del Déficit Probabilístico de Precipitación, el SPI y el RDI. Campos-Aranda (2016) también reportó sequías en una escala anual en gran parte de Zacatecas con el índice de aridez en estos mismos años. El periodo de sequía más importante en cuanto a intensidad se presentó entre 2011 y 2012.

La evolución de las series SPI, RDI y SPEI en la escala de tres meses (corto plazo) presentó una frecuencia temporal alta de los periodos de sequía y de humedad. Conforme la escala de tiempo se incrementa a 6 y 12 meses, los periodos secos y húmedos mostraron una frecuencia temporal menor y una mayor duración (Figura 3). Se definen con mayor claridad las temporadas secas y húmedas, sobre todo en la escala de 12 meses.

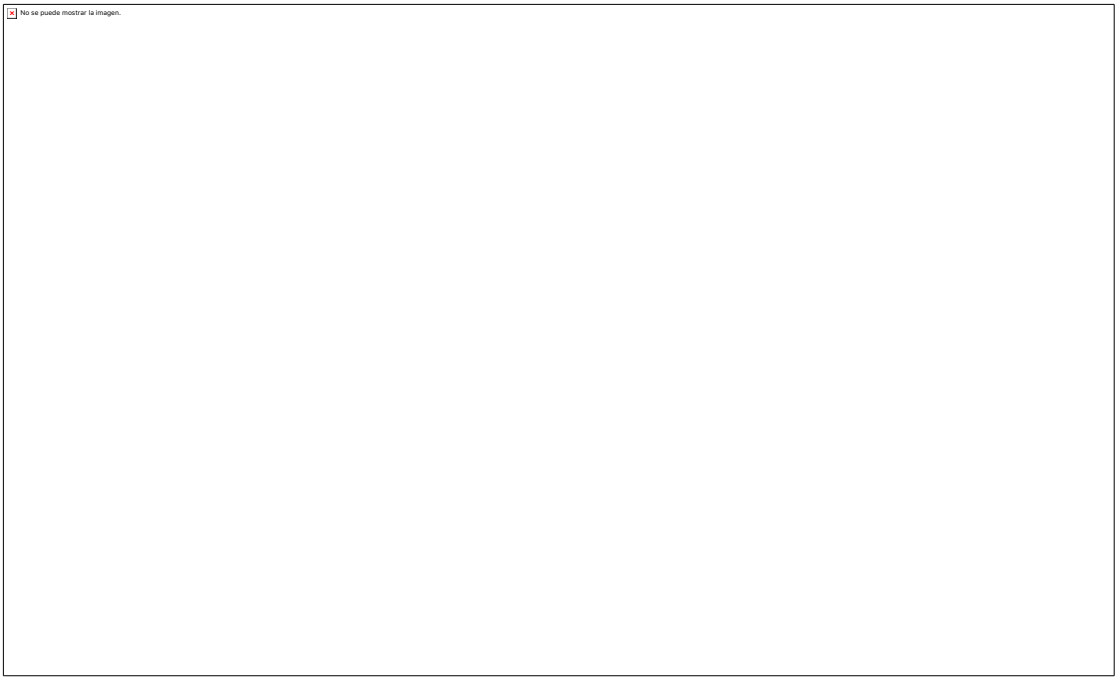

Figura 3. Evolución temporal de la sequía en las escalas de 3, 6 y 12 meses en la estación El Sauz (32018).

Características medias de las sequías

En la Tabla 4 se presenta un resumen del número de eventos de sequía y su duración media, para periodos de sequía a corto, mediano y largo plazos, determinados con los tres índices de sequía evaluados. El número medio de episodios de sequía disminuyó con el aumento de las escalas de tiempo.

Tabla 4. Número de eventos y (duración media) de los eventos de sequía determinados por el SPI, el RDI y el SPEI para el periodo 1961-2012. * El registro de esta estación es de 1971-2012.

Estación	SPI-3	RDI-3	SPEI-3	SPI-6	RDI-6	SPEI-6	SPI-12	RDI-12	SPEI-12

32052	43 (2.4)	44 (2.2)	38 (3.2)	28 (3.1)	30 (3.0)	27 (4.1)	16 (6.8)	14 (8.1)	19 (6.1)
32028	36 (2.8)	41 (2.7)	47 (2.3)	41 (2.6)	39 (2.7)	34 (2.9)	21 (5.1)	16 (5.8)	19 (5.1)
32001	37 (2.9)	42 (2.5)	45 (2.6)	32 (3.0)	26 (3.2)	34 (3.2)	10 (6.2)	11 (5.6)	19 (4.6)
32054	42 (2.3)	46 (2.3)	47 (2.1)	38 (3.1)	34 (3.0)	36 (3.1)	13 (8.9)	12 (9.4)	13 (9.1)
32018	48 (2.3)	49 (2.4)	51 (2.2)	37 (2.9)	36 (2.8)	35 (3.0)	18 (5.7)	19 (5.1)	18 (5.8)
32003	41 (2.3)	41 (2.3)	48 (2.0)	39 (2.8)	33 (3.0)	33 (3.3)	19 (5.2)	20 (5.0)	21 (5.4)
32024*	31 (2.8)	34 (2.5)	40 (2.1)	26 (3.1)	26 (3.0)	28 (3.3)	16 (5.4)	19 (4.8)	18 (5.3)
32032	47 (2.5)	46 (2.6)	44 (2.1)	38 (2.8)	37 (2.9)	39 (2.9)	18 (5.7)	15 (6.7)	13 (8.2)
32030	44 (2.5)	47 (2.4)	52 (2.0)	34 (3.1)	31 (3.1)	37 (3.1)	19 (4.8)	21 (4.2)	18 (5.7)

El número de eventos de sequía promedio en una escala de tiempo a corto plazo varió entre 36 y 48 para el SPI-3, de 41 a 49 para el RDI-3 y de 38 a 52 para el SPEI-3. La duración media de los eventos de sequía osciló de 2.3 a 2.9, de 2.2 a 2.7 y de 2.0 a 3.2 meses para el SPI-3, el RDI-3 y el SPEI-3, respectivamente. En 70% de las estaciones climatológicas el evento de sequía de mayor magnitud alcanzó la categoría de sequía severa, con el SPI-3 y el RDI-3, mientras que con el SPEI-3, 90% de las estaciones climatológicas alcanzó la categoría de sequía extrema. La duración máxima de los periodos de sequía registrados con el SPI-3 y el RDI-3 varió de 5 a 8 meses, mientras que para el SPEI-3 dicha duración fue de 4 a 7 meses.

En las dos últimas décadas se presentaron los eventos de sequía más intensos en la escala de tres meses. Según el SPI-3 y el RDI-3, estos eventos fueron de febrero a mayo de 1999, y de enero a mayo de 2011, y de acuerdo con el SPEI-3 éstos fueron de mayo a julio de 2011 y de mayo a junio de 1998.

Para la escala de seis meses, los eventos de sequía detectados por los tres índices presentan resultados relativamente similares. Los eventos de sequía promedio variaron de 28 a 41, de 26 a 39 y de 27 a 39 para el SPI-6, el RDI-6 y el SPEI-6, respectivamente. La duración media de tales eventos va desde 2.6 a 3.1 meses para el SPI-6, de 2.7 a 3.2 meses para el RDI-6 y de 2.9 a 4.1 meses para el SPEI-6. Los eventos de mayor intensidad alcanzaron la categoría de sequía extrema con el SPI-6 y el RDI-6 en todas las estaciones; con el SPEI-6 sólo 20% alcanzó esta categoría, las demás estaciones presentaron sequía severa. De acuerdo con el SPEI-6, las duraciones máximas de los periodos secos fueron muy similares entre estaciones, variando de 6 a 9 meses, mientras que de acuerdo con el SPI-6 y el RDI-6 presentaron mayor variación, de 4 a 15 meses.

Con base en el SPI-6, el RDI-6 y el SPEI-6, la región noreste de Zacatecas presentó sequías importantes en cuanto a magnitud e intensidad en las décadas de 1970 y 1980. Para las décadas de 1990 y 2000, las sequías importantes se presentaron en el centro y sur del estado.

En la escala de seis meses, el RDI-6 detectó el periodo de sequía de mayor duración (15 meses), el cual ocurrió en la región norte de Zacatecas (estación 32052). El periodo de sequía más largo detectado por el SPI-6 fue en la estación 32001 (norte de Zacatecas), también detectado por el RDI-6, el cual duró 13 meses, de junio de 1987 a junio de 1988. El SPEI-6 detectó sequía para este mismo periodo y estación, pero en dos subperiodos, uno de seis meses (de julio a diciembre de 1987) y otro de tres (de mayo a julio de 1988). El periodo de sequía de mayor duración detectado con el SPEI-6 fue de nueve meses en las estaciones 32032 y 32054, de marzo a noviembre de 2011, sur y centro-oeste de Zacatecas, respectivamente. En este mismo periodo, el SPI-6 y el RDI-6 detectaron un periodo de sequía de sólo cuatro meses, de marzo a junio de 2011.

Respecto a la escala de tiempo de 12 meses (mediano y largo plazo), el número de eventos de sequía promedio es similar para los tres índices, variando de 10 a 21 para el SPI-12, de 11 a 21 para el RDI-12 y de 13 a 21 para el SPEI-12. La duración media de los eventos de sequía oscila de 4.8 a 8.9 para el SPI-12, de 4.2 a 9.4 para el RDI-12 y de 4.6 a 9.1 meses para el SPEI-12. En esta escala, los eventos de mayor intensidad alcanzaron la categoría de sequía extrema en 70% de las estaciones con el SPI-12 y el RDI-12, y 30% de sequía severa, mientras que con el SPEI-12, sólo el 10% de las estaciones presentó sequía extrema, el 90% restante presentó sequía severa.

Las duraciones máximas de los periodos secos mediante el SPI-12 y el RDI-12 fueron similares, variando de 16 a 40 y de 14 a 40 meses, respectivamente; estas duraciones fueron menores para el SPEI-12, variando de 12 a 27 meses.

Durante el periodo de 52 años de registros climatológicos analizados en el estado de Zacatecas, las intensidades máximas de sequía en la escala de tiempo anual fueron detectadas por el SPI, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Campos-Aranda (2014, 2015) al analizar las sequías con el SPI y el RDI en el centro de Zacatecas; en las escalas de 3 y 6 meses, las intensidades máximas de sequía fueron detectadas por el SPEI y el RDI, respectivamente.

Las sequías de mayor intensidad para las tres escalas de tiempo se presentaron entre 1998 y 2011. El RDI y el SPEI también identificaron sequías extremas en 1974, 1979, 1982 y 1989. En la Figura 4 se muestra la distribución espacial del SPI, el RDI y el SPEI en el mes de mayor sequía en las tres escalas de tiempo analizadas. En la escala de tres meses, el SPI-3 y el RDI-3 identificaron el mes de abril de 2011 como el de mayor intensidad de sequía; dichos índices tienen un comportamiento espacial prácticamente igual (Figura 4a y Figura 4b). La mayor parte de Zacatecas (82%) presentó sequía severa y sólo el 8% sequía extrema. En junio de 2011 se presentó la sequía de mayor intensidad con el SPEI-3, con sequía extrema en 59% del estado, principalmente en la parte centro (Figura 4c). En la escala de seis meses, abril de 2011 también fue el mes de mayor intensidad de sequía con el SPI y RDI, el cual presentó sequía extrema en prácticamente todo el territorio de Zacatecas (figura 4d y Figura 4e). Julio de 2011 fue el mes de mayor sequía identificado por el SPEI-6; la mayor parte del territorio presentó sequía extrema (49%) y severa (39%). La sequía extrema ocurrió sobre todo en el centro y noreste de Zacatecas. En la escala de 12 meses, septiembre de 2011 fue el mes de mayor intensidad de sequía identificado por los tres índices. El SPI-12 y el RDI-12 tuvieron un comportamiento espacial semejante: identifican alrededor de 55% de Zacatecas con sequía extrema (Figura 4g y Figura 4h), principalmente sur y oeste del estado. El SPEI-12 identificó sequía extrema en 33% de Zacatecas, en las mismas regiones que el SPI-12 y el RDI-12, pero con una extensión menor.

No se puede mostrar la imagen.

Figura 4. Distribución espacial de los índices SPI, RDI y SPEI en el mes de sequía más intensa para las escalas de 3, 6 y 12 meses.

Frecuencia de las sequías

La frecuencia de las sequías se analizó con base en las diferentes clases de sequía (Tabla 2) relacionadas con los valores de los índices de sequía (SPI, RDI y SPEI). En la escala de tres meses, para los índices de sequía analizados, el tiempo promedio (porcentaje de frecuencia promedio) de periodos secos y húmedos fue de 17.1 y 16.9%, respectivamente. El 66.0% del tiempo presentó condiciones normales de precipitación. El SPI-3 y el RDI-3 presentaron mayor frecuencia de sequías moderadas (12.5 y 12.2%, respectivamente) que el SPEI-3, mientras que la frecuencia de sequías severas fue menor para el SPI-3 y el RDI-3 (4.1 y 4.8%, respectivamente) que para el SPEI-3. De los tres índices, el SPI-3 y el RDI-3 presentaron el menor número de sequías extremas. En la Figura 5a se observa el porcentaje de frecuencia de periodos secos y húmedos para el SPI-3, el RDI-3 y el SPEI-3. Con el SPI-3 y el RDI-3 sólo la región centro-oeste de estudio (estación 32054) presentó sequías extremas (14 y 15 eventos, respectivamente), mientras que con el SPEI-3 todas las estaciones presentaron eventos de sequía extrema, variando de 3 a 16 eventos para las estaciones 32052 y 32032, norte y sur de Zacatecas, respectivamente.

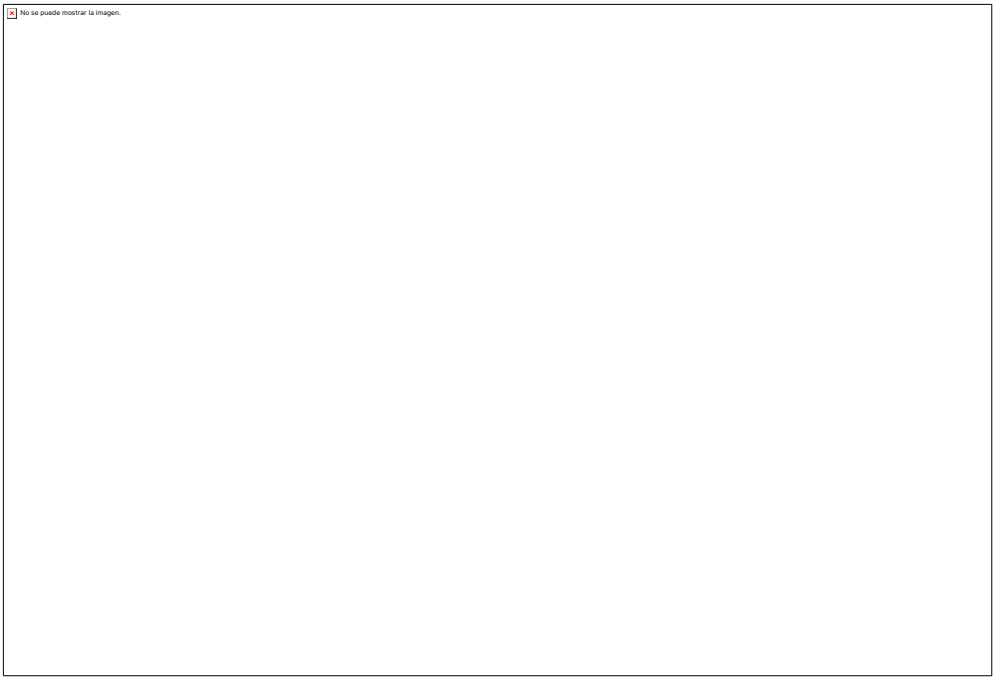

Figura 5. Distribución de frecuencia de los valores de los índices SPI, RDI y SPEI: a) escala de tres meses; b) escala de seis meses; y c) escala de 12 meses, para el periodo de 1961-2012.

En la escala de seis meses, según los tres índices multiescalares, en promedio 67.4% del tiempo hubo condiciones normales de precipitación. La frecuencia de los eventos secos fue de 16.7%, y de los eventos húmedos de 15.9%. El SPEI-6 presentó mayor frecuencia de sequías moderadas (11.0%) que el SPI-6 y el RDI-6 (8.7 y 7.7%, respectivamente). Lo mismo ocurrió con las sequías severas (Figura 5b). Sin embargo, el SPI-6 y el RDI-6 presentaron mayor frecuencia de sequías extremas que el SPEI-6, 3.4 y 3.8%, respectivamente. Con el SPI-6 y el RDI-6 se detectaron 26 y 29 eventos de sequía extrema, los cuales ocurrieron en el centro de Zacatecas (estaciones 32018 y 32030, respectivamente), mientras que con el SPEI-6, el número máximo de eventos de sequía extrema fue de 15, aconteciendo en la región norte (estación 32001). Por último, en la escala de 12 meses, el porcentaje de frecuencia promedio, de eventos normales, húmedos y secos fue de 66.6, 16.9 y 16.5%, respectivamente. La frecuencia de eventos de sequía para el SPI-12, el RDI-12 y el SPEI-12 fueron 16.3, 15.8 y 17.4%, respectivamente. El comportamiento y los valores de la frecuencia de las diferentes clases de sequía para el SPI-12, el RDI-12 y el SPEI-12 son similares a los que presentan

el SPI-6, el RDI-6 y el SPEI-6. Es decir, el SPEI-12 presenta mayor frecuencia de ocurrencia de sequías moderadas y severas que el SPI-12 y el RDI-12, y para sequías extremas sucede lo contrario, como se observa en la Figura 5c. Con el SPI-12 y el RDI-12 se detectaron 23 y 22 eventos de sequía extrema en la estación 32032 (sur de Zacatecas), mientras que con el SPEI-12, el número máximo de eventos de sequía extrema fue de 17 en la estación 32001 (norte de Zacatecas).

Correlación entre los índices de sequía

Considerando las tres escalas de tiempo y las nueve estaciones analizadas, los índices SPI *vs*. RDI son los índices que tienen correlación más alta, y sus coeficientes de correlación r varían de 0.920 a 0.996. Los coeficientes de correlación más bajos los presentan los índices SPI *vs*. SPEI, variando de 0.336 a 0.982. En la Figura 6 se muestra la tendencia general de las relaciones entre los índices SPI *vs*. RDI, SPI *vs*. SPEI y RDI *vs*. SPEI, en las escalas de 3, 6 y 12 meses mediante diagramas de dispersión para las series de los índices de la estación El Sauz (32018), ubicada en la región centro de Zacatecas.

No se puede mostrar la imagen.

Figura 6. Diagramas de dispersión para las series de SPI *vs*. RDI, SPI *vs*. SPEI y RDI *vs*. SPEI para la estación El Sauz (32018), para el periodo de 1961-2012.

En la escala de tres meses, los coeficientes de correlación *r* entre SPI-3 *vs*. RDI-3 varían de 0.920 a 0.969, mientras que entre SPI-3 *vs*. SPEI-3 y RDI-3 *vs*. SPEI-3 varían de 0.336 a 0.804 y de 0.583 a 0.867, respectivamente. En general, las correlaciones para la escala de seis meses fueron ligeramente más altas que para la escala de tres meses, variando de 0.943 a 0.964 para SPI-6

vs. RDI-6, de 0.410 a 0.834 para SPI-6 *vs*. SPEI-6, y de 0.643 a 0.906 para RDI-6 *vs*. SPEI-6. En la escala de 12 meses, los coeficientes de correlación varían de 0.952 a 0.996 para SPI-12 *vs*. RDI-12, de 0.926 a 0.982 para SPI-12 *vs*. SPEI-12, y de 0.952 a 0.993 para RDI-12 *vs*. SPEI-12. Se observó que para las escalas y estaciones analizadas, a menor escala, menor correlación entre los índices (Tabla 5). En las escalas de 3 y 6 meses, las correlaciones más bajas se presentaron al norte del estado de Zacatecas (estación 32052) y las más altas al sur (estación 32032).

Tabla 5. Coeficientes de correlación r y r_s entre los índices de sequía SPI, RDI y SPEI.

Esta-ción		**32001**		**32003**		**32028**		**32018**		**32032**		**32054**		**32052**		**32030**		**32024**	
Índice	Coefi-ciente	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s	r	r_s
SPI-3	RDI-3	0.933	0.928	0.955	0.948	0.948	0.950	0.947	0.946	0.969	0.969	0.949	0.948	0.920	0.926	0.934	0.940	0.959	0.956
	SPEI-3	0.465	0.382	0.671	0.675	0.562	0.523	0.636	0.633	0.804	0.826	0.765	0.775	0.336	0.241	0.766	0.773	0.633	0.622
RDI-3	SPEI-3	0.684	0.654	0.793	0.834	0.725	0.717	0.778	0.811	0.867	0.910	0.862	0.906	0.583	0.531	0.862	0.899	0.766	0.783
SPI-6	RDI-6	0.943	0.933	0.958	0.931	0.947	0.935	0.949	0.929	0.962	0.939	0.952	0.936	0.944	0.941	0.943	0.911	0.964	0.941
	SPEI-6	0.499	0.445	0.683	0.705	0.560	0.568	0.637	0.655	0.834	0.875	0.801	0.821	0.410	0.331	0.771	0.800	0.654	0.677
RDI-6	SPEI-6	0.716	0.704	0.812	0.891	0.750	0.782	0.803	0.858	0.906	0.970	0.901	0.945	0.643	0.600	0.886	0.948	0.790	0.860
SPI-12	RDI-12	0.996	0.996	0.996	0.996	0.987	0.988	0.996	0.995	0.952	0.936	0.991	0.990	0.996	0.996	0.980	0.977	0.991	0.989
	SPEI-12	0.964	0.980	0.982	0.986	0.950	0.951	0.981	0.985	0.926	0.912	0.976	0.981	0.927	0.940	0.952	0.959	0.962	0.960

RDI-12	SPEI-12	0.978	0.992	0.993	0.997	0.986	0.985	0.993	0.997	0.992	0.997	0.991	0.998	0.952	0.960	0.991	0.997	0.987	0.989

Los valores de los coeficientes de correlación de Spearman (Tabla 5) presentaron valores semejantes a los del coeficiente de Pearson. Tal como sucedió con el coeficiente r, se observó que para las escalas analizadas los coeficientes r_s aumentaban con la escala. También se observó que para las escalas de 3 y 6 meses, los índices SPI *vs*. RDI presentaron los mayores valores de r_s, en tanto que los índices SPI *vs*. SPEI presentaron los menores valores. Para la escala de 12 meses, los índices RDI-12 *vs*. SPEI-12 y SPI-12 *vs*. RDI-12 presentaron los mayores coeficientes r_s. Los coeficientes r y r_s presentaron mayor similitud conforme aumentaba la escala.

Para el caso de estudio, el empleo del SPI y del RDI resultó más adecuado para la caracterización de la sequía meteorológica. Según Gocic y Trajkovic (2014), y Xu *et al*. (2015), el RDI y el SPI son índices más adecuados que el SPEI para caracterizar la sequía en zonas áridas y semiáridas, lo cual coincide con los resultados de esta investigación.

Por otro lado, cabe destacar que la selección de la función de distribución de probabilidad en el análisis de los índices de sequías, puede influir en los resultados obtenidos, subestimando o sobreestimando los eventos de sequía. Por lo tanto, es conveniente determinar mediante un análisis de frecuencia, la función de distribución que se ajuste mejor a las series de precipitación, precipitación/evapotranspiración y precipitación - evapotranspiración, para evaluar los índices SPI, RDI y SPEI, respectivamente.

Conclusiones

Los índices multiescalares de sequía meteorológica utilizados en esta investigación permitieron caracterizar las sequías en los últimos 50 años en el

estado de Zacatecas, México, obteniendo el número, inicio, final, duración, magnitud, intensidad y categoría de los eventos de sequía.

Los tres índices de sequía aplicados mostraron resultados consistentes en la detección de los eventos de sequía, en particular los de mayor magnitud; con independencia de la escala temporal del índice, su uso permitió un análisis complementario de la variabilidad espacial y temporal de las sequías.

El número de eventos de sequía detectados con los tres índices tuvo menor frecuencia y mayor duración conforme la escala temporal de análisis aumentó. Las tres escalas presentaron eventos de sequía de categoría moderada a extrema, de corta y mediana duración en las escalas de 3 y 6 meses, y de media a larga duración para la escala de 12 meses. El RDI presentó el mayor número de sequías en la escala de tres meses, y en la escala de 6 y 12 meses, el SPI y el SPEI, respectivamente.

El análisis espacial de las sequías muestra que las áreas más afectadas por este fenómeno son la región noroeste, centro y sur del estado. En estas zonas se encuentran ubicadas las principales zonas agrícolas de temporal y de riego de Zacatecas.

Los coeficientes de correlación de Pearson y de Spearman fueron mayores conforme aumentó la escala de análisis de los índices multiescalares. Los coeficientes r y r_s confirman que existe una mayor similitud entre los resultados del SPI y el RDI para las escalas de 3 y 6 meses. En la escala de 12 meses, el comportamiento de los tres índices fue semejante, siendo los resultados del RDI y el SPEI los que presentaron la mayor similitud. Por lo cual, si se dispone de información de temperatura es conveniente aplicar el RDI para el análisis de sequías en regiones semiáridas, pues incorpora otras variables climatológicas que juegan un papel importante durante el desarrollo de un evento de sequía, como la evapotranspiración. No obstante, en ausencia de información de temperatura o por facilidad de cálculo, para las escalas de análisis el SPI es una buena alternativa para la estimación de las características de las sequías.

La caracterización de las sequías históricas es importante para generar información relacionada con déficits hídricos durante los periodos de sequía, la cual permite diseñar políticas con el fin de disminuir los daños de eventos futuros de sequía. Dada la importancia del sector agrícola en el estado de Zacatecas, los resultados encontrados pueden ayudar principalmente en la

toma de decisiones sobre los patrones de cultivo y la asignación óptima de agua en el Distrito de Riego 034 Estado de Zacatecas.

Agradecimientos

Al Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación de Zacatecas (Cozcyt), México, por los fondos aportados al proyecto Fomix-Conacyt, "Estudio de las sequías meteorológicas en el Estado de Zacatecas, y desarrollo de un prototipo de bajo costo para el monitoreo de un sistema de abastecimiento de agua potable", con clave ZAC-2013-C02-201203.

Referencias

Ahmad, M. I., Sinclair, C. D., & Werritti, A. (1988). Log-logistic flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 98, 205-224.

Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., & Hrissanthou, V. (2012). Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water Resources Management*, 26, 2453-2473.

Asadi-Zarch, M. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., & Kousari, M. R. (2011). Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water Resources Management*, 25, 3485-3504.

Asadi-Zarch, M. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI). *Journal of Hydrology*, 526, 183-195.

Banimahd, S. A., & Khalili, D. (2013). Factors influencing Markov chains predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones. *Journal of Water Resources Management*, 27, 3911-3928.

Cai, W., Zhang, Y., Yao, Y., & Chen, Q. (2015). Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area in China. *Atmosphere*, 6, 431-450.

Campos-Aranda, D. F. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas. *Agrociencia*, 48, 463-476.

Campos-Aranda, D. F. (2015). Contraste de los índices DPP, SPI y RDI para clasificación de sequías, en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 183-193.

Campos-Aranda, D. F. (2016). Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 405-417.

Caparrini, F., & Manzella, F. (2009). Hydrometeorological and vegetation indices for the drought monitoring system in Tuscany Region, Italy. *Advanced in Geosciences*, 17, 105-110.

Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cenapred. (2002). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2001*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres Naturales. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.

Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cenapred. (2003). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2002*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres Naturales. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.

Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cenapred. (2004). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2003*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres Naturales. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.

Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cenapred. (2007). *Fascículo Sequías.* México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.

Comisión Nacional del Agua, Conagua. (2014). *Base de datos en el sistema CLIma COMputarizado (CLICOM)*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua.

Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology*. New Jersey, USA: Prentice Hall.

Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997*). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales* (155 pp.) (Climatology Report 97-2). Fort Collins, Colorado, USA: Department of Atmospheric Science, Colorado State University.

Escalante, C., & Reyes, L. (1998). Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa. *Ingeniería Hidráulica en México*, 13(2), 23-43.

Gocic, M., & Trajkovic, S. (2014). Drought characterisation based on water surplus variability index. *Water Resources Management*, 28, 3179-3191.

Guttman, N. B. (1994). On the sensitivity of sample L moments to sample size. *Journal of Climate*, 7, 1026 -1029.

Haan, C. T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa, USA: The Iowa State University Press.

Hänsel, S., Medeiros, D. M., Matschullat, J., Petta, R. A., & de Mendonça-Silva, I. (2016). Assessing homogeneity and climate variability of temperature and precipitation series in the capitals of North-Eastern Brazil. *Frontiers in Earth Science*, 4. DOI: 10.3389/feart.2016.00029

Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin American Meteorology Society*, 92, 485-488.

Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 429-438.

Herron, C. A. (2013). *Agua y cambio climático en México 2007-2012: Análisis y recomendaciones a futuro*. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/AyCCMex 2007-2012.pdf

Kavalieratou, S., Karpouzos, D. K., & Babajimopoulos, C. (2012). Drought analysis and short-term forecast in the Aison River Basin (Greece). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 1561-1572.

Kirono, D. G. C., Kent, D. M., Hennessy, K. J., & Mpelasoka, F. (2011). Characteristics of Australian droughts under enhanced greenhouse conditions:

Results from 14 global climate models. *Journal of Arid Environments*, 75, 566-575.

Kousari, M. R., Dastorani, M. T., Niazi, Y., Soheili, E., Hayatzadeh, M., & Chezgi, J. (2014). Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of reconnaissance drought index (RDI) and application of non-parametrical statistical method. *Water Resources Management,* 28, 1857-1872.

Li, B., Liang, Z., Yu, Z., & Acharya, K. (2014). Evaluation of drought and wetness episodes in a cold region (Northeast China) since 1898 with different drought indices. *Natural Hazards*, 71, 2063-2085.

Lopez-Bustins, J. A., Pascual, D., Pla, E., & Retana, J. (2013). Future variability of droughts in three Mediterranean catchments. *Natural Hazards*, 69, 1405-1421

López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477, 175-188.

McEvoy, D. J., Huntington, J. L., Abatzoglou, J. T., & Edwards, L. M. (2012). An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and Eastern California. *Earth Interactions*, 16, 1-18.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology Series 3-7*, National Climatic Data Center, Ashville, N.C.

Mirza, M. M. Q. (1997). Hydrological changes in the Ganges system in Bangladesh in the post-Farakka period. *Hydrological Sciences-Journal*, 42, 613-631.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought* (58 pp.) (Research Paper No. 45). Washington, DC, USA: Commerce Weather Bureau.

Samaniego, L., Kumar, R., & Zink, M. (2013). Implications of parameter uncertainty on soil moisture drought analysis in Germany. *Journal of Hydrometeorolgy*, 14, 47-68.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Semarnat. (2012). *Informe de la situación del medio ambiente en México, compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Singh, V. P., Guo, H., & Yu, F. X. (1993). Parameter estimation for 3-parameter log-logistic distribution (LLD3) by Pome. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 7, 163-177.

Tabios III, G. Q., & Salas, J. D. (1985). A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Journal of the American Water Resources Association*, 21, 365-380.

Teuling, A. J., Van Loon, A. F., Seneviratne, S. I., Lehner, I., Aubinet, M., Heinesch, B., Bernhofer, C., Grünwald, T., Prasse, H., & Spank, U. (2013). Evapotranspiration amplifies European summer drought. *Geophysical Research Letters*, 40, 2071-2075.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geography Review*, 38, 55-94.

Tigkas, D. (2008). Drought characterisation and monitoring in regions of Greece. *European Water*, 23/24, 29-39.

Touma, D., Ashfaq, M., Nayak, M. A., Kao, S. C., & Diffenbaugh, N. S. (2015). A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century. *Journal of Hydrology*, 526, 196-207.

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21, 821-833.

Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9, 3-11.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Journal of Climate*, 23, 1696-1718.

Vicente-Serrano, S. M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C., & López-Moreno, J. I. (2015). Contribution of precipitation and reference

evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*, 526, 42-54.

Vrochidou, A.-E. K., & Tsanis, I. K. (2012). Assessing precipitation distribution impacts on droughts on the island of Crete. *Natural Hazards Earth System Science*, 12, 1159-1171.

World Meteorological Organization, WMO. (2012). *Standardized precipitation index user guide*. In: Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (eds.) (WMO-No. 1090). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

Wu, H., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2005). The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. *International Journal Climatology*, 25, 505-520.

Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 526, 253-264.

Zelen, M., & Severo, N. C. (1965). Probability Functions. In: M. Abramowitz, & I. Stegun (eds.), *Handbook of Mathematical Functions* (pp. 925-995). New York, USA: Dover Publications.